

Modelado y control de helicópteros autónomos.

Revisión del estado de la técnica

Béjar, M. * Ollero, A. ** ***

* Universidad Pablo de Olavide
 Área de Ingeniería de Sistemas y Automática
 Ctra. Utrera Km1, 41013 Sevilla, España
 e-mail: mbejdom@upo.es

** Universidad de Sevilla

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática
 Camino de los Descubrimientos s/n, 41092, Sevilla, España
 e-mail: aollero@cartuja.us.es

*** Centro Avanzado de Tecnologías Aeroespaciales
 Aerópolis, Parque Tecnológico Aeroespacial de Andalucía
 N-IV, Km. 529, Calle Wilbur y Orville Wright, 17
 41309, La Rinconada - Sevilla, España
 e-mail: aollero@catec.aero

Resumen: Este artículo presenta una revisión del estado de la técnica del modelado y control de helicópteros autónomos que incluye algunas de las plataformas de helicópteros autónomos más utilizadas así como arquitecturas de control existentes, y aspectos relacionados con la estimación del estado y la detección de fallos. Se aborda también la elección e identificación de modelos para los helicópteros autónomos. A continuación se trata con cierto detalle el sistema de control, presentando diferentes métodos e introduciendo también la planificación de trayectorias y la realización de maniobras agresivas. Copyright © 2008 CEA.

Palabras Clave: helicópteros autónomos - control de helicópteros autónomos- modelado e identificación de helicópteros - arquitecturas de control- robótica aérea.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos diez años la tecnología de los vehículos aéreos no tripulados, conocidos por sus siglas en inglés Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), ha experimentado un importante desarrollo motivado por sus ventajas en misiones con riesgo para vuelos tripulados o con requerimientos de elevada maniobrabilidad o dimensiones reducidas en las aeronaves. Los costes de explotación de los UAVs también pueden ser menores que los de vuelos tripulados en diferentes aplicaciones.

Las aplicaciones militares de los UAVs son bien conocidas. Recientemente, la evolución de las tecnologías de los UAVs, la miniaturización de los sensores y los progresos en comunicaciones y sistemas de control empotrados apuntan hacia su uso generalizado en aplicaciones como desastres naturales, búsqueda y rescate, vigilancia, inspección de instalaciones y estructuras, vigilancia, cinematografía y realización de mapas del terreno (Ollero and Maza 2007).

En algunas de las mencionadas aplicaciones se necesitan funcionalidades como el despegue-aterrizaje vertical y el vuelo estacionario que pueden conseguirse mediante UAVs como helicópteros y otras plataformas con múltiples rotores. En Castillo *et al.* (2007) se presentan técnicas de control de estos últimos. Los helicópteros autónomos son las plataformas más utilizadas en robótica aérea debido a las propiedades mencionadas anteriormente y a una mayor carga útil que la ofrecida por otras aeronaves de despegue y aterrizaje vertical. Sin embargo, los

helicópteros autónomos son más difíciles de controlar y tienen mayores problemas de fiabilidad y seguridad que los UAVs de ala fija y otras plataformas. La Fig. 1 muestra los sistemas de referencia que suelen utilizarse para expresar sus parámetros principales de funcionamiento.

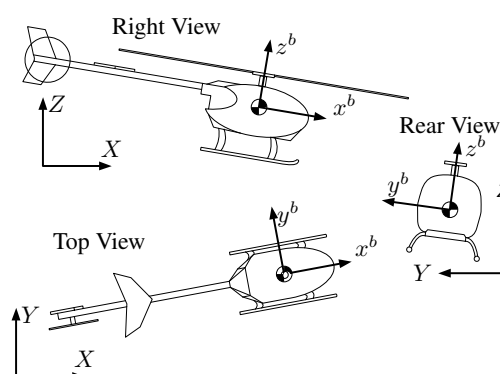


Figura 1. Sistemas inercial (XYZ) y local ($x^b y^b z^b$).

La posición y orientación del helicóptero se controla normalmente mediante 5 variables: la inclinación colectiva de las palas del rotor principal (colectivo) que tiene un efecto directo en la altura del helicóptero (eje z en el sistema $X-Y-Z$); el cíclico longitudinal que modifica el ángulo de cabeceo del helicóptero (rotación sobre el eje y^b en el sistema $x^b-y^b-z^b$) y la traslación longitudinal; el cíclico lateral, que afecta el ángulo de balanceo (rotación sobre el eje x^b en el sistema $x^b-y^b-z^b$) y la

traslación lateral; el rotor de cola, el cual controla el ángulo de guiñada del helicóptero (rotación sobre el eje z^b en el sistema $x^b - y^b - z^b$); y el control de la potencia del motor. El sistema dinámico del helicóptero es no lineal multivariable con fuerte acoplamiento en algunos bucles.

Existen diferentes revisiones del estado del arte de los helicópteros autónomos desde distintos puntos de vista. En Yang and Song (1995) se considera el modelado incluyendo aspectos como aerodinámica y aeroelasticidad de los rotores. En Bortoff (1999) y Kondak *et al.* (2006) se estudian las diferencias entre los helicópteros a escala y los helicópteros reales, estableciendo criterios para extrapolar entre los resultados conseguidos en uno y otro caso.

En Shim *et al.* (1998a) y en la reciente referencia Zeng *et al.* (2006), se realizan revisiones de técnicas de control y se da una perspectiva de las posibles líneas de evolución futura. Prouty and Jr. (2003) ofrecen algunas conclusiones de interés sobre aspectos de la implementación. Finalmente, existen también trabajos más específicos, como el estudio sobre las perturbaciones generadas por el viento que se presenta en Gaonkar (2008).

En Ollero and Merino (2004) se presenta una visión conjunta en robótica aérea incluyendo las primeras plataformas robóticas para la implementación de helicópteros autónomos, las arquitecturas y métodos de control existentes en el momento, así como algunas referencias a técnicas de visión por computador.

En este artículo se pretende considerar tanto las principales técnicas de modelado y control como su implantación práctica. Por ello se considera en primer lugar una sección dedicada a las plataformas de helicópteros más utilizadas, a las arquitecturas de control, y a técnicas de estimación de estado y detección de fallos. Posteriormente, la sección 3 Modelado e Identificación expone los principales modelos dinámicos de helicópteros a escala presentes en la literatura así como los algoritmos de identificación empleados para la estimación de parámetros en dichos modelos. A continuación la sección de Técnicas de Control revisa los diferentes métodos de control de helicópteros autónomos empleados en los últimos años. Se consideran también aspectos relacionados con la consecución de maniobras agresivas y la planificación de trayectorias. Finalmente, se presentan las conclusiones y las referencias.

2. PLATAFORMAS Y ARQUITECTURAS DE CONTROL

2.1 Plataformas

Como se ha puesto de manifiesto anteriormente, los helicópteros han sido las aeronaves más utilizadas en robótica aérea debido a sus propiedades de despegue y aterrizaje vertical, vuelo estacionario, maniobrabilidad y carga útil. A estas características cabe añadir la existencia de numerosos productos en el mercado de vehículos de radio-control para aplicaciones recreativas y de fotografía aérea. Por todo ello numerosos laboratorios de investigación han desarrollado robots aéreos basados en la evolución de estas plataformas, que normalmente tienen una carga útil inferior a los 7 Kilogramos y un tiempo de vuelo inferior a los 45 minutos.

Existen también otras plataformas construidas por empresas para distintas aplicaciones. Las más conocidas son las Yamaha R50 y Rmax que han sido ampliamente utilizadas para fumigación en Japón. El Yamaha Rmax tiene una carga útil de 31 Kg, un tiempo de vuelo de 1.5 horas y un alcance de 16 Kilómetros

(ver Fig. 2). Otros helicópteros autónomos son el Camcopter de Schiebel y el RQ8 FireScout de Northrop Grumman con una carga útil de 136 Kilogramos, 5 horas de vuelo y alcance de 280 Kilómetros.



Figura 2. Plataforma Yamaha Rmax.

Entre los centros de investigación que han desarrollado plataformas de robótica aérea basadas en helicópteros autónomos cabe mencionar la Carnegie Mellon University que, a principios de los años 90, desarrolló plataformas basadas en helicópteros de radio control y que posteriormente adoptó los helicópteros Yamaha. Otras instituciones como las University of California in Berkeley, University of Southern California y Georgia Institute of Technology, han seguido el mismo camino.



Figura 3. Helicópteros autónomos utilizados en los proyectos COMETS y AWARE. A la izquierda el prototipo Marvin I. En el centro, el Marvin II. A la derecha un experimento coordinado realizado en AWARE.

En Europa cabe mencionar, entre otros, las plataformas desarrolladas por la Universidad Técnica de Berlín (ver Fig. 3), ETH Zurich (Eck *et al.* 2001), y la Universidad de Linköping (Doherty *et al.* 2000) que también utiliza el Yamaha Rmax. En España hay que mencionar las plataformas de la Universidad Politécnica de Madrid (Barrientos *et al.* 2002) y las de la Universidad de Sevilla. En la Fig. 4 se muestran tres de los helicópteros desarrollados por el Grupo de Robótica, Visión y Control de esta última.



Figura 4. Helicópteros de la Universidad de Sevilla

2.2 Arquitecturas de Control

Las arquitecturas de control de UAVs integran diversos sensores de navegación incluyendo giróscopos, acelerómetros, magnetómetros, GPS y sensores barométricos, entre otros. Normalmente existen diferentes modos de control para distintas condiciones de despegue, aterrizaje y vuelo que se implementan mediante los servocontroladores de los ejes. Las estrategias básicas de control incluyen aterrizaje, seguimiento de secuencias

de puntos definidos por sus coordenadas GPS, con eventual vuelo estacionario, y aterrizaje.

La robótica aérea ha llevado al desarrollo de arquitecturas de control inteligente que incluyen funcionalidades de percepción del entorno, seguimiento de objetivos móviles, control reactivo para evitación de obstáculos y programas de planificación de trayectorias, eventualmente coordinadas con las de otros UAVs (Maza and Ollero 2004). En los últimos años también se han implantado a bordo programas de asignación de tareas.

El sistema de navegación y control a bordo se comunica con una estación en tierra que permite visualizar el vuelo, enviar las correcciones del GPS diferencial, y transmitir órdenes del operador o de programas de planificación y coordinación con otros sistemas.

Se han desarrollado diversas arquitecturas de control de UAVs tales como la basada en comportamientos de la University of Southern California para el control de los helicópteros AVATAR. Los comportamientos de bajo nivel corresponden a la generación de las órdenes básicas de control (colectivo, potencia, cíclico lateral, cíclico longitudinal y rotor de cola). El segundo nivel implementa las transiciones de altitud y velocidad lateral. El comportamiento del nivel superior (control de navegación) es responsable del seguimiento de puntos de paso definidos por sus coordenadas y ángulo de guiñada.

La arquitectura desarrollada en la Universidad de Berkeley también es jerarquizada con diferentes niveles de abstracción que involucran funciones de planificación, interacción con el entorno y control. El sistema de control y gestión de vuelo incluye capas de estabilización, seguimiento, generación de trayectorias, y conmutación entre diferentes modos de control.

La arquitectura de control de los helicópteros HERO de la Universidad de Sevilla es también jerarquizada. El nivel inferior se implementa mediante un DSP TMI2812 mientras que los niveles superiores se asocian a un PC-104. Este último ejecuta programas de supervisión, conmutación entre modos de vuelo, percepción del entorno para seguimiento visual, estimación de posición mediante visión y construcción de mosaicos (incluyendo la aplicación de técnicas SLAM).

Se han implantado también estrategias mixtas de guiado manual y autónomo. Estas estrategias son necesarias por razones de seguridad y para facilitar el desarrollo del sistema autónomo. Existen también aplicaciones en las que resulta interesante implantar únicamente funciones de estabilización del helicóptero dejando que sea un operador en tierra el que envíe las consignas de posición y velocidad mediante el mando de radio-control. Otras posibilidades son las de definición de puntos de paso de forma interactiva desde la estación en tierra.

Para concluir esta sección conviene señalar los siguientes aspectos prácticos de interés en el desarrollo de helicópteros autónomos, que se han puesto de manifiesto en los proyectos desarrollados en la Universidad de Sevilla:

- Necesidad de contar con pilotos de radio-control para el desarrollo del sistema autónomo y por razones de seguridad. Estos pilotos deben tener la suficiente experiencia para tomar el control en situaciones de emergencia.
- Importancia del mantenimiento mecánico y prueba de todos los componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos antes de cada vuelo, lo que es especialmente crítico en pla-

taformas de bajo coste construidas a partir de helicópteros de radio-control.

- Relevancia de las limitaciones de peso y consumo, particularmente en los helicópteros pequeños que imponen importantes restricciones en el hardware y software que puede ejecutarse a bordo. Estas limitaciones hacen especialmente interesante el empleo de avances recientes en miniaturización de sensores y actuadores y el empleo de sistemas empotrados de control.
- Relevancia del diseño mecatrónico involucrando conjuntamente aspectos mecánicos, sensores y controladores a bordo. Interés de la aplicación de técnicas de "hardware in the loop" y eventualmente de plataformas para prueba en interiores.
- Interés de la aplicación de técnicas de detección e identificación de fallos en sensores y actuadores.
- Requerimientos estrictos de seguridad en las pruebas y vuelos del helicóptero, sin olvidar la importante energía que desarrolla el rotor principal y las consecuencias de los fallos.

2.3 Estimación del estado y detección de fallos

Dentro de los aspectos relacionados con la implementación de una plataforma robótica comentados en el apartado anterior, merecen especial atención los algoritmos encargados del correcto procesamiento de la información proporcionada por los actuadores y sensores del helicóptero. El objetivo es obtener una estimación del estado del helicóptero, definido este como una serie de magnitudes lineales y angulares que identifican de forma unívoca la situación del helicóptero. Estas magnitudes serán utilizadas en aplicaciones de modelado y control como las que se exponen en secciones posteriores. Para realizar esta estimación del estado resulta conveniente aplicar técnicas de fusión sensorial que utilicen las medidas de los sensores y que tengan en cuenta sus propiedades estadísticas.

Una de las principales herramientas para la estimación del estado es el filtro de Kalman. Jun *et al.* (1999) proponen dos filtros de Kalman diferenciados, uno aplicado para el giróscopo y otro para las medidas del acelerómetro. La originalidad del enfoque propuesto radica en que no requiere de unas ecuaciones dinámicas de referencia como sucede en la aplicación estándar del filtro de Kalman. En Doyle and Harris (1996) se proponen métodos de fusión basados en modelos neuro-fuzzy, consiguiendo también mejorar algunas limitaciones del filtro de Kalman (dificultades con la inicialización e incluso problemas de divergencia e inestabilidad) cuando se aplica a sistemas altamente no lineales. La estimación adaptativa de offsets en la medida de dispositivos de bajo coste se recoge también en Cheviron *et al.* (2007).

Otro campo que está cobrando una importancia creciente en los UAVs es la detección de fallos en actuadores y sensores. Heredia *et al.* (2005) proponen sistemas de detección y diagnóstico de fallos aplicados a los sensores. Con tal fin, se evalúan continuamente los cambios significativos que pudieran aparecer en el comportamiento del vehículo aéreo con respecto al vehículo libre de fallos. La base de estas comprobaciones es un observador basado en el consiguiente modelo dinámico. Los mismos autores completaron sus resultados en Heredia *et al.* (2008) con la inclusión de este tipo de técnicas también para los actuadores.

3. MODELADO E IDENTIFICACIÓN

Una vez que se dispone de una plataforma fiable, incluyendo la aviónica y la algorítmica necesarias para registrar los valores de sensores y actuadores, el siguiente paso es caracterizar su comportamiento dinámico mediante un conjunto de ecuaciones. El objetivo es implementar estas ecuaciones en un entorno de simulación por computador que permita probar los diferentes algoritmos y controladores propuestos. Para obtener este tipo de modelos se pueden adoptar dos enfoques:

1. Partir de principios físicos (ecuaciones del sólido rígido, generación de pares y fuerzas de acuerdo a principios aerodinámicos, ...) para obtener un modelo en el que los parámetros tengan un sentido físico.
2. Utilizar un conjunto de expresiones sin sentido físico pero convenientemente ajustadas para reproducir el comportamiento entrada-salida del helicóptero.

En la Fig. 5 se muestra un esquema del primer tipo. La dinámica del modelo queda dividida en 5 subsistemas: Servos, Motor, Aerodinámica de Rotores y Fuselaje, Generación de Fuerzas-Pares y Sólido Rígido.

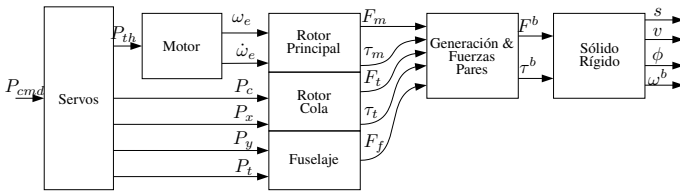


Figura 5. Esquema de la dinámica de un helicóptero

Las señales de control se expresan con la variable P y un subíndice que identifica la entrada específica: P_c (colectivo), P_x (cíclico longitudinal), P_y (cíclico lateral), P_t (colectivo cola) y P_{th} (control del motor). De igual forma P_{cmd} engloba a estas 5 entradas de control antes de la dinámica de los actuadores. F y τ se refieren respectivamente a las fuerzas y pares que se aplican en el sistema de referencia local, mientras que s (posición lineal en sistema inercial), v (velocidad lineal en sistema inercial), ϕ (ángulos Euler) y ω^b (velocidad angular en sistema local) componen el estado del helicóptero.

Asimismo, la complejidad del conjunto de ecuaciones desarrollado (y por tanto el grado de fidelidad en la reproducción del comportamiento del UAV) es otra cuestión que admite varias estrategias. Los modelos de elevada complejidad resultan a veces poco apropiados para el desarrollo de ciertas técnicas de control, optándose en estos casos por expresiones simplificadas que capturen los principales comportamientos dinámicos. En cualquier caso, los modelos complejos de gran fidelidad son siempre útiles para simulaciones previas a la implantación final.

Uno de los trabajos que alcanza mayor equilibrio entre la complejidad de las ecuaciones y la fidelidad en la reproducción del comportamiento real es el de Kondak *et al.* (2006). Se trata de un modelo basado en principios dinámicos que considera como sólidos rígidos separados al fuselaje y al rotor principal. Esta separación permite un posterior análisis cualitativo de la interacción entre ambos sólidos, llegándose a expresiones analíticas simplificadas en función de estas consideraciones. En la línea de modelos de mayor complejidad, Bhandari *et al.* (2007) presentan un modelo de 12 grados de libertad, que incluye aspectos avanzados acerca del comportamiento del rotor principal

como la caracterización de la barra estabilizadora. Este trabajo se aplica sobre el helicóptero comercial Raptor 50 y tiene sus primeras referencias en Bhandari *et al.* (2005) y Bhandari and Colgren (2006). En sintonía con el anterior modelado de ciertos subsistemas específicos del UAV se encuentra la aportación de Peng *et al.* (2007), la cual muestra que la caracterización de la dinámica de guiñada es inexacta en las principales referencias bibliográficas y propone las correcciones oportunas. Sin embargo, en la Tesis de Deeg (2005), que incluye un detallado modelo que contempla la consideración de la precesión giroscópica en el cabeceo y balanceo, se pone de manifiesto que el modelado del efecto de la barra estabilizadora es de importancia secundaria. En esta misma Tesis se estudia con detalle la aerodinámica de los rotores (principal y cola) empleando para ello una combinación de la teoría de momentos de pala (Blade Element Theory) y la teoría de los momentos validando los modelos mediante experimentos con los robots aéreos Marvin que se muestran en la Figura 3.

Por lo que respecta al segundo enfoque indicado anteriormente, cabe mencionar el trabajo de Martin *et al.* (2007), basado en la aplicación de redes neuronales, y que es la continuación del trabajo con modelos híbridos de redes neuronales supervisadas que ya presentaban en Martin *et al.* (2006). Aportaciones como la de Lope *et al.* (2007) van en la misma línea. Finalmente, cabe destacar el trabajo de modelado de Downs *et al.* (2007) en el ámbito militar con el conocido prototipo MQ-8B fire scout.

Una vez que se opta por un modelo concreto, se debe conseguir el mejor ajuste posible de los parámetros de dicho modelo al comportamiento real de la plataforma, tarea que puede resultar difícil debido a los comportamientos no lineales y acoplamientos en distintas condiciones de vuelo.

En Morris *et al.* (1994a) se identifica mediante algoritmos básicos lineales un modelo en el espacio de estado para la condición de vuelo estacionario. En esta línea de trabajos que tratan de simplificar el problema, Hazawa *et al.* (2004a) presentan un modelado e identificación basados en la caracterización de funciones de transferencia, con sólo una entrada y una salida (SISO), que se formulan realizando previamente un análisis cinemático de las principales relaciones entrada-salida del helicóptero. En el conocido trabajo de Kim and Tilbury (2004) se presenta un modelo relativamente complejo que incorpora aspectos como la interacción entre la barra estabilizadora y el rotor principal, que no obstante puede ser reducido a funciones de transferencia SISO para facilitar la identificación. Con tal fin, son necesarios unos montajes ad-hoc que aíslen las dinámicas asociadas a dichas relaciones SISO simplificadas dentro del modelo no lineal completo. De esta forma se pueden realizar experimentos para hallar valores numéricos de los parámetros correspondientes.

Otros trabajos muy conocidos en modelado e identificación son los de Mettler *et al.* (1999, 2002) y Cheng *et al.* (2006). En este caso se aplican técnicas frecuenciales a modelos complejos que incorporan los principales efectos dinámicos del acoplamiento entre los rotores, la barra estabilizadora del rotor principal y el fuselaje. La herramienta utilizada a tal efecto, CIPHER (Comprehensive Identification from Frequency Responses), ha sido desarrollada conjuntamente por la Universidad de California y la armada de Estados Unidos. El banco de pruebas para la aplicación de estos algoritmos ha sido el conocido Yamaha R-MAX, validándose el modelado tanto en posiciones de vuelo estacionario como en maniobras de desplazamientos longitudi-

dinal o lateral. Los valores obtenidos en la identificación son compatibles con los principios dinámicos del helicóptero, lo que refuerza la validez del método.

Finalmente, cabe mencionar los prometedores trabajos preliminares sobre la utilización del Filtro de Kalman para la identificación de modelos de UAVs que se presentan en Kallapur *et al.* (2007).

4. CONTROL

En esta sección se hace una revisión de las principales técnicas de control propuestas para helicópteros autónomos durante los últimos años. Si bien es posible encontrar en la literatura algunos enfoques simples como el control PID clásico o la utilización de estrategias lineales extrapoladas a diferentes puntos de trabajo, cuya implantación ha dado buenos resultados, la consideración de las incertidumbres y la minimización del efecto de perturbaciones externas ha llevado a la formulación de estrategias de control más sofisticadas.

Para facilitar la lectura se han agrupado las referencias citadas según las técnicas de control que apliquen. No obstante, esta clasificación sólo tiene un carácter orientativo puesto que son muchas las aportaciones que combinan varias técnicas en una misma estrategia de control. En estos casos se ha pretendido situar la aportación en el campo que se ha considerado más relevante.

Finalmente, conviene destacar la importancia de conocer las principales relaciones entrada-salida para facilitar el diseño del algoritmo de control. Tal y como mostraba la Fig. 5, el helicóptero es un sistema multivariable y subactuado cuya dinámica presenta gran complejidad. No obstante, haciendo ciertas simplificaciones es posible obtener relaciones entrada-salida básicas que capturen los principales efectos dinámicos. Estas relaciones se muestran en la Tabla 1 donde las variables traslacionales están expresadas en el sistema de referencia local definido en la Fig. 1.

Cuadro 1. Relaciones entrada-salida básicas

Entrada de Control	Traslación	Rotación
P_c	z^b	-
P_t	-	ϕ_z
P_x	x^b	ϕ_y
P_y	y^b	ϕ_x

4.1 Estrategias Lineales

Pese al título de esta sección, los algoritmos aquí citados no se limitan a utilizar estrategias estrictamente lineales y deterministas, ya que esto no sería suficiente para controlar una dinámica no lineal tan compleja como la de un helicóptero. De esta forma algunas referencias proponen la conmutación entre diferentes controladores lineales según el punto de trabajo en que se encuentre el sistema, mientras que otras se basan en el regulador lineal con índice cuadrático (LQR) y en su extensión para considerar ruidos gaussianos (LQG).

Así Sutarto *et al.* (2006) proponen un control lineal conmutado que se compara con el rendimiento de un LQR. En Morris *et al.* (1994b) se presenta otro controlador en el espacio de estados, en este caso un LQG. En línea con la conmutación de controladores lineales, en Kim *et al.* (2004, 2006) se asocia una ley de control a cada régimen de vuelo (lateral, vertical,

...). Los algoritmos empleados son control lineal por realimentación y control robusto. Otras aplicaciones de control óptimo cuadrático se presentan en Shin *et al.* (2004) para controlar en posición y orientación un helicóptero. En Hazawa *et al.* (2004b) se emplean también controladores LQG y LQR con términos integrales. Finalmente, cabe citar los trabajos de Shim *et al.* (1998b) que plantean la comparación de un controlador lineal robusto multivariable con estrategias más avanzadas de control no lineal.

4.2 Linealización por Realimentación

Una técnica utilizada como base de numerosos trabajos es la linealización del sistema por realimentación. Como se sabe, esta técnica consiste en aplicar una transformación no lineal para obtener un sistema resultante lineal sobre el que se aplican técnicas clásicas de control como PID.

De esta forma, Liceaga-Castro *et al.* (1989) convierten la dinámica del helicóptero en un conjunto de 4 subsistemas lineales controlables de una única entrada sobre los que aplican estrategias básicas lineales. También Kagawa *et al.* (2005) proponen una linealización por realimentación para realizar un control en altitud y guiñada. Asimismo, se pueden encontrar trabajos en esta línea aplicados al helicóptero Yamaha RMAX, como en Nakanishi and Inoue (2002). En el conocido trabajo de Calise *et al.* (1994) se propone la utilización conjunta de linealización por realimentación y redes neuronales. El objetivo de las redes es compensar el error de inversión producido en la linealización por realimentación, asociado mayormente a posibles discrepancias entre el modelo y el sistema real.

4.3 Control Predictivo

El control predictivo también ha sido propuesto como alternativa para controlar UAVs, si bien el número de trabajos es bastante limitado y en muchos casos se restringe a modelos simplificados de la dinámica del helicóptero.

En particular, en Dutka *et al.* (2003) se presenta un controlador predictivo no lineal aplicado a un modelo de 2 grados de libertad, en donde las predicciones sobre las futuras señales de control se utilizan para calcular las predicciones sobre el estado del sistema. Witt *et al.* (2008) presentan un controlador predictivo no lineal multivariable, basado en la linealización del sistema en cada instante de muestreo que aplican a un modelo simplificado de 3 grados de libertad. Puede mencionarse también el trabajo de Wan and Bogdanov (2001) con un modelo completo de la dinámica que combina una red neuronal con el control basado en la ecuación de Riccati dependiente del estado. En este caso se utiliza el control predictivo con horizonte deslizante para optimizar la red neuronal.

4.4 Modos Deslizantes

Aunque las aplicaciones de estas técnicas al control de helicópteros autónomos no son numerosas, cabe mencionar el trabajo de Pieper (1995) en el que se discuten métodos de diseño de hiperplanos para obtener controladores por modos deslizantes. Asimismo, en Shin *et al.* (2002) se propone este tipo de controladores para el seguimiento de trayectorias.

4.5 Control Robusto

Tal y como se adelantaba al principio, existen bastantes referencias de control robusto en la bibliografía. Los esquemas típicos

H_2 y H_∞ se basan en la optimización de índices con las normas del mismo nombre.

En Fujiwara *et al.* (2004) se describe un esquema mixto, controlador PID para los ángulos y dinámica traslacional regulada mediante control H_∞ . Con tal fin se diseñan cuatro funciones de transferencia que tengan la forma definida por las especificaciones frecuenciales. En la misma línea, pero haciendo uso de la versión no lineal del control H_∞ , Yang and Liu (2003) garantizan el rechazo de perturbaciones necesario para la estabilidad. Otro uso de la variedad no lineal de H_∞ es el desacople entre las dinámicas traslacionales y rotacionales, tal y como se muestra en Yang *et al.* (2002).

De gran interés por su carácter experimental son los trabajos de Civita *et al.* (2003a,b, 2006) en la Carnegie Mellon University en los que se desarrolló un controlador H_∞ para el control del Yamaha R-50. Los resultados muestran el rendimiento del controlador en maniobras de elevada velocidad con dicho helicóptero. Existen otras alternativas de control robusto que también han sido exploradas por los investigadores. En Avila *et al.* (2003) se consideran también estrategias robustas frente a incertidumbres en los parámetros. En Marconi *et al.* (2002), Isidori *et al.* (2003), Bejar *et al.* (2005) y Marconi and Naldi (2007) se presentan leyes no lineales de control robusto basadas en modelo interno y funciones de saturación. La realización de maniobras agresivas o el aterrizaje autónomo en la cubierta de un buque son algunas de las posibles aplicaciones.

4.6 Algoritmos de Aprendizaje

En Bagnell and Schneider (2001) se emplean modelos de máxima similitud de Markov y algoritmos clásicos de reforzamiento basados en modelo para calcular los criterios óptimos de aprendizaje. Asimismo, Puntunan and Parnichkun (2006) plantean la adición de una precompensación a un módulo PID que controla la guiñada. Dicha precompensación se hace mediante modelos borrosos del tipo Takagi-Sugeno, que aprenden a sintonizarse automáticamente en línea. Por último, en Montgomery and Bekey (1998), se propone una estructura de control neuro-borrosa generada y sintonizada mediante un algoritmo de aprendizaje para emular el comportamiento de un operador humano mientras pilota el helicóptero.

4.7 Algoritmos Genéticos

Los algoritmos genéticos también han sido empleados para el ajuste de controladores de helicópteros autónomos. Como ejemplo puede mencionarse el trabajo de Phillips *et al.* (1996), donde las leyes de evolución genética sirven para generar reglas eficientes para la lógica borrosa de control. En Wade and Walker (1996), de nuevo se incorporan estos algoritmos para sintonizar reglas borrosas y conjuntos lingüísticos que mejoren el rendimiento del control.

4.8 Leyes Adaptativas

Se emplean métodos que tienen como objetivo adaptar el modelo y el controlador al efecto de las variaciones del entorno y en particular al viento.

Los trabajos de Krupadanam *et al.* (2002a,c) presentan un control adaptativo para hacer frente a incertidumbres ambientales y de modelado. Se consiguen buenos resultados incluso para maniobras generales de velocidad arbitraria y con gran ancho

de banda. En Guo *et al.* (2002) se plantea la complementariedad entre las redes neuronales y los mecanismos adaptativos para su ajuste. Se demuestra que el rendimiento del esquema propuesto supera al del enfoque clásico de controladores PI. En Andrievsky *et al.* (2005) y Bejar and Raimundez (2007) se aplica el control adaptativo con modelo de referencia para filtrar las trayectorias propuestas y adecuarlas así a la dinámica del helicóptero.

4.9 Lógica Borrosa

Si bien se ha hecho ya referencia a algunos trabajos que incorporaban algún tipo de lógica borrosa, en esta sección se presentan las aportaciones más específicas.

La aplicación del control borroso a los helicópteros autónomos tiene su origen en los trabajos de Sugeno desde principios de los años 90 (Sugeno *et al.* 1995a,b). Mediante una organización jerárquica en módulos básicos (control de cola, etc.) que son activados por modos de alto nivel (asociados a regímenes básicos de vuelo, como puede ser el vuelo frontal), las estrategias borrosas planteadas posibilitan la ejecución de maniobras complejas, como giros combinados con elevaciones. También son conocidas las aportaciones de Kadmiry *et al.* (2001) y Kadmiry and Driankov (2004a,b). En ese caso se considera un controlador borroso que consigue maniobrabilidad agresiva de forma robusta y estable. La estructura de control consta de un planificador de ganancias y un controlador lingüístico del tipo Mamdani. Finalmente en Sanchez *et al.* (2005, 2007) se combinan las leyes clásicas PID con técnicas de control borroso para mimetizar la forma en que un piloto experto maneja el helicóptero.

4.10 Redes Neuronales

Como se comentaba en apartados anteriores, el empleo de redes neuronales hace posible la aplicación de métodos adaptativos que permiten obtener un comportamiento robusto frente a incertidumbres del modelado o incluso de las condiciones del entorno, como puede ser el efecto del viento.

La aplicación de las redes neuronales a helicópteros autónomos se presentó en Kim and Calise (1997), donde se planteaba el uso combinado de linealización por realimentación y redes neuronales. Estas últimas se utilizaban tanto para la transformación correspondiente a la linealización (con entrenamiento fuera de línea) como para compensar los errores de modelado que pudieran aparecer (entrenamiento en línea). En la Fig. 6 se muestra un esquema ilustrativo de la combinación de linealización por realimentación y redes neuronales.

Se utiliza la misma notación de la Fig. 5 para entradas y salidas. Los términos adaptativos generados por la red neuronal (a_{ad} , α_{ad}) cancelan los errores de modelado mientras que los términos de Corrección de los Bucles (a_h , α_h), en inglés Pseudo-Control-Hedging, evitan adaptaciones no deseadas de la red neuronal a aspectos como la saturación de los actuadores (Johnson and Calise, 2001). Las referencias a seguir son s_c , v_c , ϕ_c y ω_c^b mientras que ϕ_{des} y ω_{des}^b son los valores impuestos al bucle interno (dinámica rotacional) por el bucle externo de control (dinámica traslacional).

En Leitner *et al.* (1997), se estudia el esfuerzo de control requerido por la técnica, que resulta ser leve y sólo perceptible en el primer período de entrenamiento de la red. Hasta ese

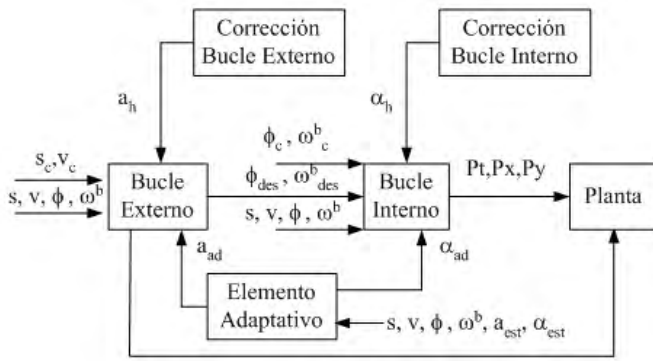


Figura 6. Redes neuronales en esquema típico de control UAVs, donde el Bucle Externo incluye las variables traslacionales mientras que el Bucle Interno agrupa las variables angulares.

momento, los resultados se habían quedado en la simulación. Sin embargo, en Corban *et al.* (1998) se presentan ya trabajos experimentales. Existen también aplicaciones en simuladores de alta fidelidad de helicópteros militares como en Leitner *et al.* (1998). Continuando en esta línea, Prasad *et al.* (1999) y Kutay *et al.* (2005) presentan algunas mejoras como la utilización del PCH (Pseudo Control Hedging) mencionado anteriormente para tener en cuenta la adaptación en los actuadores.

En Johnson and Kannan (2005a) se presentan refinamientos adicionales como la técnica de ubicación de polos para mejorar la separación de la dinámica en dos escalas de tiempo. En Nakanishi and Inoue (2003) se presenta la aplicación de las redes neuronales al control del Yamaha RMAX. Además, en Enns and Si (2000, 2001) se emplea la denominada programación dinámica neuronal de redes directas (DNDR), generándose un sistema de control capaz de realizar maniobras complejas. En este caso se empleó un simulador avanzado del helicóptero militar Apache.

4.11 Métodos de Lyapunov

Existen también trabajos en los que se diseñan controladores garantizando la estabilidad mediante métodos de Lyapunov. Así Mahony and Hamel (2004) utilizan funciones de Lyapunov para conseguir acotaciones en las prestaciones del seguimiento de trayectorias en la aceleración lineal y sus derivadas. En Kaloust *et al.* (1997) se utiliza el método directo de Lyapunov para demostrar la estabilidad del controlador de un helicóptero con dos grados de libertad situado en una plataforma robótica, demostrándose la estabilidad semiglobal en el seguimiento de la consigna de altitud. En Mazenc *et al.* (2003) se presentan técnicas de adelanto para generar una función de control de Lyapunov que estabiliza exponencial (localmente) y asintóticamente (globalmente) de forma robusta al sistema completo. Asimismo, Krupadanam *et al.* (2002b) demuestran la estabilidad global del esquema de control multivariable adaptativo que proponen para desarrollar maniobras generales de velocidades arbitrarias y con prestaciones de gran ancho de banda. Finalmente, cabe mencionar los trabajos de Gonzalez *et al.* (2004) que presentan un análisis de estabilidad de la dinámica rápida correspondiente a un esquema de control con dos escalas de tiempo, dinámicas traslacional (lenta) y rotacional (rápida), de uso típico en vehículos aéreos autónomos, empleando también una función de Lyapunov.

4.12 Planificación de Trayectorias y Maniobras Agresivas

En los apartados anteriores se hacía una revisión de los principales algoritmos de control de vehículos aéreos autónomos. En los mencionados trabajos el problema de control se definía como el seguimiento de una consigna para una determinada variable, típicamente de posición, sin especificaciones de más alto nivel como pudieran ser la velocidad impuesta para tal movimiento o restricciones simultáneas aplicadas a otras variables como la adopción de una determinada orientación en guiñada. Obsérvese que, cuando se planifica el movimiento completo a lo largo de una trayectoria determinada, se necesita verificar también la compatibilidad entre la trayectoria propuesta y las restricciones dinámicas del vehículo aéreo en cuestión, tal como se hace en la planificación de trayectorias para vehículos autónomos terrestres (Munoz *et al.* 1994). Para resolver estas cuestiones se han desarrollado métodos de planificación de trayectorias como los que se mencionan a continuación.

En Sira-Ramirez *et al.* (2000) se consideran sistemas de Liouville para realizar un control asociado a una planificación de trayectorias fuera de línea. Johnson and Kannan (2005b) utilizan modelos de referencia para filtrar las trayectorias impuestas y conseguir consignas compatibles con la dinámica del helicóptero. Otro enfoque interesante es el que proponen Frazzoli *et al.* (2005) describiendo el plan de movimiento como la concatenación de una serie de primitivas de movimiento definidas con anterioridad. La aplicación de esta idea en sistemas no lineales invariantes con el tiempo que presenten ciertas simetrías en su comportamiento (como es el caso de los helicópteros), convierte la planificación de trayectorias en la resolución de una secuencia de problemas de inversión cinemática. Asimismo, en Frazzoli *et al.* (2000) se considera la generación de trayectorias en el propio sistema de referencia del helicóptero.

En línea con lo anterior, existen trabajos que utilizan modelos inversos de la dinámica del helicóptero. El resultado es una transformación inversa del modelo dinámico que, teniendo como entrada ciertas trayectorias deseadas, obtiene como salida las correspondientes consignas de control. Así, Celi (2000) presenta una formulación general de dinámica inversa basada en un algoritmo de optimización, siendo las entradas del sistema variables a ajustar para conseguir una trayectoria a la vez que se optimiza cierta función de coste. La metodología se aplica al caso concreto de soluciones de velocidad máxima. En Cao (2000) se presentan otros mecanismos alternativos de dinámica inversa para obtener mejores prestaciones en lo que se refiere a la estabilidad y convergencia de la simulación de los modelos en giros y maniobras laterales especiales.

Para finalizar, se mencionan algunos trabajos que ponen especial énfasis en la realización de maniobras agresivas. Además de controladores avanzados también son necesarios modelos complejos que reflejen las dinámicas excitadas en este tipo de maniobras.

Con sus primeros trabajos, Gavrillets *et al.* (2001) analizan la ejecución de maniobras agresivas por parte de pilotos experimentados, infiriendo complejos modelos no lineales para tales comportamientos extremos del helicóptero. Posteriormente, en Gavrillets *et al.* (2004) aplican una lógica de control basada en una máquina de estados, que también se inspira en el comportamiento del piloto humano. La base de este enfoque consiste en asociar controladores multivariables convencionales a cada maniobra o estado posible en dicha máquina de transiciones.

La gestión de transiciones entre diferentes estados tiene en cuenta aspectos como la reinicialización de los integradores del controlador. Finalmente puede mencionarse la arquitectura de control híbrida para maniobras agresivas propuesta por Frazzoli *et al.* (1999). En este caso se utiliza también un autómata cuyos estados de referencia son unas primitivas que representan las trayectorias elementales realizables por el UAV. La selección de primitivas para generar la trayectoria resultado se considera como un problema de optimización con requerimientos compatibles con la resolución en tiempo real.

5. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

En este artículo se ha pretendido presentar las principales líneas de trabajo en el modelado y control de helicópteros autónomos. La exposición se ha basado en una revisión de las principales referencias del estado de la técnica en los últimos años.

Se han citado trabajos de contenido exclusivamente teórico así como aportaciones experimentales que incluyen la implementación en helicópteros autónomos. El creciente número de entidades involucradas permite concluir que el desarrollo de helicópteros autónomos es una línea de investigación en auge. El elevado número de aplicaciones potenciales mencionadas en la introducción y la relativa facilidad para adquirir plataformas de este tipo, parecen justificar tal auge.

La revisión de las arquitecturas de control actuales y la enumeración de los condicionantes en este tipo de implementaciones ponen de manifiesto la complejidad de contar con una plataforma fiable de estas características. Aspectos como el adecuado diseño mecatrónico o el correcto tratamiento de las señales obtenidas por los sensores pueden condicionar el rendimiento del sistema.

Cuando se trata de modelar matemáticamente un helicóptero el primer paso es elegir una estructura general que pueda reflejar la compleja dinámica de este tipo de vehículos aéreos. Dicha elección debe ser un compromiso entre la fiabilidad en la reproducción de la dinámica real y la complejidad analítica de las ecuaciones adoptadas, ya que muchos algoritmos de control se basan en estas expresiones. Se recomienda la combinación de modelos simplificados para el desarrollo del controlador y otros más complejos y de mayor fidelidad para simulaciones que permitan validar el sistema de control antes de su implantación en el helicóptero autónomo.

La elección del modelo sólo aporta una estructura base para identificar matemáticamente al UAV. El paso que realmente conlleva gran dificultad es la obtención de los valores numéricos óptimos para los parámetros de esta estructura. Si bien son numerosas las referencias en este campo, en la literatura se echan en falta procedimientos sistemáticos de uso generalizado. En este sentido la herramienta CIFER podría considerarse como la referencia más prometedora.

Una vez que se caracteriza la plataforma robótica mediante un modelo matemático, las opciones para encontrar una estrategia de control adecuada son numerosas, desde las basadas en la combinación de PID's con transformaciones entre sistemas de referencia a otras mucho más complejas que requieren una importante capacidad de cálculo en tiempo real. Aunque en la actualidad es posible emplear computadores empujados, es necesario verificar cuidadosamente si las prestaciones adicionales de dichos controladores son suficientemente relevantes como para justificar el coste de estos sistemas y la dificultad de ajustar

y mantener estrategias complejas de control. Este puede no ser el caso en aplicaciones que sólo requieran transiciones suaves entre puntos de paso y vuelos estacionarios sin condiciones exigentes en los que respecta a las perturbaciones atmosféricas.

Finalmente conviene mencionar la existencia de nuevos problemas de interés en robótica aérea tales como el transporte de cargas o el aterrizaje autónomo en plataformas móviles, que no se han tratado en este artículo y que serán objeto de desarrollos futuros. Recientemente, en el marco del proyecto AWARE (<http://www.aware-project.net>), se ha demostrado por primera vez (ver Fig. 7) el transporte de una carga mediante tres helicópteros como los que se muestran en la Fig. 3. Como trabajos futuros cabe mencionar la aplicación de nuevas técnicas de control para incrementar la fiabilidad de estos sistemas de control ante perturbaciones tales como ráfagas importantes de viento, y la implantación de estrategias de control tolerantes a fallos.



Figura 7. Transporte conjunto de carga mediante 3 helicópteros

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado dentro de los proyectos AWARE (VI Programa Marco de la Comisión Europea) y ROBAUCO (Programa PROFIT del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio).

Los autores agradecen la colaboración prestada por la Universidad Técnica de Berlín dentro del proyecto AWARE, con mención especial para Konstantin Kondak por sus valiosas contribuciones. Asimismo, expresar nuestra gratitud a Marco La Civita por su asesoramiento. Finalmente, se reconocen las aportaciones del resto de componentes del Grupo de Robótica, Visión y Control (GRVC), sin las cuales este trabajo no habría podido realizarse.

REFERENCIAS

- Andrievsky, B., A. Fradkov and D. Peaucelle (2005). Adaptive control experiments for laas "helicopter" benchmark. In: *2005 International Conference on Physics and Control, PhysCon 2005*. Vol. 2005. pp. 760–765.
- Avila, J. C., B. Brogliato, A. Dzul and R. Lozano (2003). Nonlinear modelling and control of helicopters.. *Automatica* **39**(9), 1583–1596(14).
- Bagnell, J. A. and J. G. Schneider (2001). Autonomous helicopter control using reinforcement learning policy search methods. In: *2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Vol. 2. pp. 1615–1620.

- Barrientos, A., J. Del Cerro, P. Campoy and P.J. García (2002). An autonomous helicopter guided by computer vision for inspection of overhead power cables. In: *Workshop on Aerial Robotics - IEEE / RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS 2002*.
- Bejar, M., A. Isidori, L. Marconi and R. Naldi (2005). Robust vertical/lateral/longitudinal control of an helicopter with constant yaw-attitude. In: *44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference, CDC-ECC '05*. Vol. 2005. pp. 6192–6197.
- Bejar, M. and J. C. Raimundez (2007). Application of adaptive control to 2dof helicopter model. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial* **4**(1), 35–40.
- Bhandari, S., A. Samuel and R. Colgren (2007). 12-dof dynamics model of a uav helicopter using analytical and parameter identification techniques. In: *American Helicopter Society International 63rd Annual Forum - Riding the Wave of New Vertical Flight Technology*. Vol. 1. pp. 495–506.
- Bhandari, S. and R. Colgren (2006). 6-dof dynamic model for a raptor 50 uav helicopter including stabilizer bar dynamics. In: *AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference, 2006*. Vol. 2. pp. 1138–1154.
- Bhandari, S., R. Colgren, P. Lederbogen and S. Kowalchuk (2005). Six-dof dynamic modeling and flight testing of a uav helicopter. In: *AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference 2005*. Vol. 2. pp. 992–1008.
- Bortoff, Scott A. (1999). The university of toronto rc helicopter: A test bed for nonlinear control. In: *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Control Applications (CCA) and IEEE International Symposium on Computer Aided Control System Design (CACSD)*. Vol. 1. Piscataway, NJ, United States. pp. 333–338.
- Calise, A. J., B. S. Kim, J. Leitner and J. V. R. Prasad (1994). Helicopter adaptive flight control using neural networks. In: *Proceedings of the 33rd IEEE Conference on Decision and Control. Part 1 (of 4)*. Vol. 4. Piscataway, NJ, United States. pp. 3336–3341.
- Cao, Y. (2000). New inverse solution technique for studying helicopter maneuvering flight. *Journal of the American Helicopter Society* **45**(1), 43–53.
- Castillo, P., P. Garcia, R. Lozano and P. Albertos (2007). Modeling and stabilization of a mini helicopter having four rotors. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial* **4**(1), 41–57.
- Celi, R. (2000). Optimization-based inverse simulation of a helicopter slalom maneuver. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* **23**(2), 289–297.
- Cheng, R. P., M. B. Tischler and G. J. Schulein (2006). R-max helicopter state-space model identification for hover and forward-flight. *Journal of the American Helicopter Society* **51**(2), 202–210.
- Chevion, T., T. Hamel, R. Mahony and G. Baldwin (2007). Robust nonlinear fusion of inertial and visual data for position, velocity and attitude estimation of uav. In: *2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA'07*. pp. 2010–2016.
- Civita, M. La, G. Papageorgiou, W. C. Messner and T. Kanache (2003a). Integrated modeling and robust control for full-envelope flight of robotic helicopters. In: *2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Vol. 1. pp. 552–557.
- Civita, M. La, G. Papageorgiou, W. C. Messner and T. Kanade (2003b). Design and flight testing of a gain-scheduled h infinite loop shaping controller for wide-envelope flight of a robotic helicopter. In: *2003 American Control Conference*. Vol. 5. pp. 4195–4200.
- Civita, M. La, G. Papageorgiou, W. C. Messner and T. Kanade (2006). Design and flight testing of an h infinite controller for a robotic helicopter. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* **29**(2), 485–494.
- Corban, J. E., A. J. Calise and J. V. R. Prasad (1998). Implementation of adaptive nonlinear control for flight test on an unmanned helicopter. *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control* **4**, 3641–3646.
- Deeg, C. (2005). Modeling, simulation and implementation of an autonomous flying robot.
- Doherty, P., G. Granlund, K. Kuchcinski, E. Sandewall, K. Nordberg, E. Skarman and J. Wiklund (2000). The witas unmanned aerial vehicle project. In: *Proceedings of the 14th European Conference on Artificial Intelligence*. pp. 747–755.
- Downs, J., R. Prentice, S. Dalzell, A. Besachio, C. M. Ivler, M. B. Tischler and M. H. Mansur (2007). Control system development and flight test experience with the mq-8b fire scout vertical take-off unmanned aerial vehicle (vtuav). In: *American Helicopter Society International 63rd Annual Forum - Riding the Wave of New Vertical Flight Technology*. Vol. 1. pp. 566–592.
- Doyle, R. S. and C. J. Harris (1996). Multi-sensor data fusion for helicopter guidance using neuro-fuzzy estimation algorithms. *Aeronautical Journal* **100**(996), 241–251.
- Dutka, A. S., A. W. Ordys and M. J. Grimble (2003). Non-linear predictive control of 2 dof helicopter model. In: *42nd IEEE Conference on Decision and Control*. Vol. 4. pp. 3954–3959.
- Eck, C., J. Chapuis and H.P. Geering (2001). Software-supported design and evaluation of low-cost navigation units. In: *Proceedings of the 8th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*. pp. 163–172.
- Enns, R. and J. Si (2000). Helicopter flight control design using a learning control approach. In: *39th IEEE Conference on Decision and Control*. Vol. 2. pp. 1754–1759.
- Enns, R. and J. Si (2001). Helicopter tracking control using direct neural dynamic programming. In: *International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN'01)*. Vol. 2. pp. 1019–1024.
- Frazzoli, E., M. A. Dahleh and E. Feron (1999). Hybrid control architecture for aggressive maneuvering of autonomous helicopters. In: *The 38th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*. Vol. 3. Piscataway, NJ, United States. pp. 2471–2476.
- Frazzoli, E., M. A. Dahleh and E. Feron (2000). Trajectory tracking control design for autonomous helicopters using a backstepping algorithm. In: *2000 American Control Conference*. Vol. 6. Piscataway, NJ, United States. pp. 4102–4107.
- Frazzoli, E., M. A. Dahleh and E. Feron (2005). Maneuver-based motion planning for nonlinear systems with symmetries. *IEEE Transactions on Robotics* **21**(6), 1077–1091.
- Fujiwara, D., J. Shin, K. Hazawa and K. Nonami (2004). H infinite hovering and guidance control for autonomous small-scale unmanned helicopter. *Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, C Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C* **70**(6), 1708–1714.
- Gaonkar, G. H. (2008). Review of turbulence modeling and related applications to some problems of helicopter flight dynamics. *Journal of the American Helicopter Society* **53**(1), 87–107.

- Gavrilets, V., B. Mettler and E. Feron (2004). Human-inspired control logic for automated maneuvering of miniature helicopter. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* **27**(5), 752–759.
- Gavrilets, V., E. Frazzoli, B. Mettler, M. Piedmonte and E. Feron (2001). Aggressive maneuvering of small autonomous helicopters: A human-centered approach. *International Journal of Robotics Research* **20**(10), 795–807.
- Gonzalez, A., R. Mahtani, M. Bejar and A. Ollero (2004). Control and stability analysis of an autonomous helicopter. In: *Robotics: Trends, Principles, and Applications - International Symposium on Robotics and Applications, ISORA - Sixth Biannual World Automation Congress, WAC 2004*. pp. 399–404.
- Guo, L., C. Melhuish and Q. Zhu (2002). Towards neural adaptive hovering control of helicopters. In: *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Control Applications*. Vol. 1. pp. 54–58.
- Hazawa, K., J. Shin, D. Fujiwara, K. Igarashi, D. Fernando and K. Nonami (2004a). Autonomous flight control of hobby-class small unmanned helicopter (modeling based on experimental identification and autonomous flight control experiments). *Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, C Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C* **70**(3), 720–727.
- Hazawa, K., J. Shin, D. Fujiwara, K. Igarashi, D. Fernando and K. Nonami (2004b). Autonomous flight control of hobby-class small unmanned helicopter (modeling based on experimental identification and autonomous flight control experiments). *Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, C Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C* **70**(3), 720–727.
- Heredia, G., A. Ollero, M. Bejar and R. Mahtani (2008). Sensor and actuator fault detection in small autonomous helicopters. *Mechatronics* **18**(2), 90–99.
- Heredia, G., A. Ollero, R. Mahtani, M. Bejar, V. Remuss and M. Musial (2005). Detection of sensor faults in autonomous helicopters. In: *2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Vol. 2005. pp. 2229–2234.
- Isidori, A., L. Marconi and A. Serrani (2003). Robust nonlinear motion control of a helicopter. *IEEE Transactions on Automatic Control* **48**(3), 413–426.
- Johnson, E. N. and A. J. Calise (2001). Neural network adaptive control of systems with input saturation. In: *2001 American Control Conference*. Vol. 5. pp. 3527–3532.
- Johnson, E. N. and S. K. Kannan (2005a). Adaptive trajectory control for autonomous helicopters. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* **28**(3), 524–538.
- Johnson, E. N. and S. K. Kannan (2005b). Adaptive trajectory control for autonomous helicopters. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* **28**(3), 524–538.
- Jun, Myungsoo, Stergios I. Roumeliotis and Gaurav S. Sukhatme (1999). State estimation of an autonomous helicopter using kalman filtering. In: *1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'99): Human and Environment Friendly Robots with High Intelligence and Emotional Quotients*. Vol. 3. Piscataway, NJ, United States. pp. 1346–1353.
- Kadmiry, B. and D. Driankov (2004a). A fuzzy flight controller combining linguistic and model-based fuzzy control. *Fuzzy Sets and Systems* **146**(3), 313–347.
- Kadmiry, B. and D. Driankov (2004b). A fuzzy gain-scheduler for the attitude control of an unmanned helicopter. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* **12**(4), 502–515.
- Kadmiry, B., P. Bergsten and D. Driankov (2001). Autonomous helicopter control using fuzzy gain scheduling. In: *2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Vol. 3. pp. 2980–2985.
- Kagawa, M., H. Katayama and A. Ichikawa (2005). Attitude control of a helicopter model by feedback linearization. In: *SICE Annual Conference 2005*. pp. 1870–1875.
- Kallapur, A. G., S. S. Ali and S. G. Anavatti (2007). *Application of extended Kalman filter towards UAV identification*. Vol. 76.
- Kaloust, J., C. Ham and Z. Qu (1997). Nonlinear autopilot control design for a 2-dof helicopter model. *IEE Proceedings: Control Theory and Applications* **144**(6), 612–616.
- Kim, B. S. and A. J. Calise (1997). Nonlinear flight control using neural networks. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* **20**(1), 26–33.
- Kim, B., Y. Chang and M. H. Lee (2006). System identification and 6-dof hovering controller design of unmanned model helicopter. *JSME International Journal, Series C: Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing* **49**(4), 1048–1057.
- Kim, B., Y. Chang, J. Keh, H. Ha and M. Lee (2004). Design of 6-dof attitude controller of hovering model helicopter. In: *IECON 2004 - 30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society*. Vol. 1. pp. 104–110.
- Kim, S. K. and D. M. Tilbury (2004). Mathematical modeling and experimental identification of an unmanned helicopter robot with flybar dynamics. *Journal of Robotic Systems* **21**(3), 95–116.
- Kondak, K., M. Bernard, N. Losse and G. Hommel (2006). Elaborated modeling and control for autonomous small size helicopters. *VDI Berichte* (1956), 207–216.
- Krupadanam, A. S., A. M. Annaswamy and R. S. Mangoubi (2002a). Multivariable adaptive control design with applications to autonomous helicopters. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* **25**(5), 843–851.
- Krupadanam, A. S., A. M. Annaswamy and R. S. Mangoubi (2002b). Multivariable adaptive control design with applications to autonomous helicopters. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* **25**(5), 843–851.
- Krupadanam, A. S., A. M. Annaswamy and R. S. Mangoubi (2002c). A multivariable adaptive controller for autonomous helicopters. In: *2002 American Control Conference*. Vol. 3. pp. 2052–2057.
- Kutay, A. T., A. J. Calise, M. Idan and N. Hovakimyan (2005). Experimental results on adaptive output feedback control using a laboratory model helicopter. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* **13**(2), 196–202.
- Leitner, J., A. Calise and J. V. R. Prasad (1997). Analysis of adaptive neural networks for helicopter flight control. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* **20**(5), 972–979.
- Leitner, Jesse, Anthony Calise and J. V. R. Prasad (1998). Full authority helicopter adaptive neuro-controller. In: *Proceedings of the 1998 IEEE Aerospace Conference. Part 1 (of 5)*. Vol. 2. Los Alamitos, CA, United States. pp. 117–126.
- Liceaga-Castro, E., R. Bradley and R. Castro-Linares (1989). Helicopter control design using feedback linearization techniques. In: *Proceedings of the 28th IEEE Conference on Decision and Control. Part 1 (of 3)*. Vol. 1. Piscataway, NJ, United States. pp. 533–534.

- Lope, J. De, J. J. S. Martin and J. A. Martin H (2007). *Helicopter flight dynamics using soft computing models*. Vol. 4739 LNCS of *11th International Conference on Computer Aided Systems Theory, EUROCAST 2007*. las palmas de gran canaria ed.
- Mahony, R. and T. Hamel (2004). Robust trajectory tracking for a scale model autonomous helicopter. *International Journal of Robust and Nonlinear Control* **14**(12), 1035–1059.
- Marconi, L., A. Isidori and A. Serrani (2002). Autonomous vertical landing on an oscillating platform: An internal-model based approach. *Automatica* **38**(1), 21–32.
- Marconi, L. and R. Naldi (2007). Robust full degree-of-freedom tracking control of a helicopter. *Automatica* **43**(11), 1909–1920.
- Martin, R. San, A. Barrientes, P. Gutierrez and J. Del Cerro (2007). Neural networks training architecture for uav modelling. In: *2006 World Automation Congress, WAC'06*.
- Martin, R. San, A. Barrientos, P. Gutierrez and J. Del Cerro (2006). Unmanned aerial vehicle (uav) modelling based on supervised neural networks. In: *2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2006*. Vol. 2006. pp. 2497–2502.
- Maza, I. and A. Ollero (2004). Multiple uav cooperative searching operation using polygon area decomposition and efficient coverage algorithms. *Proceedings of the 7th International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems* pp. 211–220.
- Mazenc, F., R. E. Mahony and R. Lozano (2003). Forwarding control of scale model autonomous helicopter: A lyapunov control design. In: *42nd IEEE Conference on Decision and Control*. Vol. 4. pp. 3960–3965.
- Mettler, B., M. B. Tischler and T. Kanade (2002). System identification modeling of a small-scale unmanned rotorcraft for flight control design. *Journal of the American Helicopter Society* **47**(1), 50–63.
- Mettler, B., M. B. Tischler and Takeo Kanade (1999). System identification of small-size unmanned helicopter dynamics. *Annual Forum Proceedings - American Helicopter Society* **2**, 1706–1717.
- Montgomery, James F. and George A. Bekey (1998). Learning helicopter control through ‘teaching by showing’. *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control* **4**, 3647–3652.
- Morris, John C., Michiel van Nieuwstadt and Pascale Bendotti (1994a). Identification and control of a model helicopter in hover. In: *Proceedings of the 1994 American Control Conference. Part 1 (of 3)*. Vol. 2. Green Valley, AZ, United States. pp. 1238–1242.
- Morris, John C., Michiel van Nieuwstadt and Pascale Bendotti (1994b). Identification and control of a model helicopter in hover. In: *Proceedings of the 1994 American Control Conference. Part 1 (of 3)*. Vol. 2. Green Valley, AZ, United States. pp. 1238–1242.
- Munoz, V., A. Ollero, M. Prado and A. Simon (1994). Mobile robot trajectory planning with dynamic and kinematic constraints. In: *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway, NJ, United States. pp. 2802–2807.
- Nakanishi, H. and K. Inoue (2002). Development of autonomous flight control systems for unmanned helicopter by use of neural networks. In: *2002 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN'02)*. Vol. 3. pp. 2626–2631.
- Nakanishi, H. and K. Inoue (2003). Development of autonomous flight control system for unmanned helicopter by use of neural networks. In: *International Joint Conference on Neural Networks 2003*. Vol. 3. pp. 2400–2405.
- Ollero, A. and I. Maza (2007). *Multiple Heterogeneous Unmanned Aerial Vehicles*. Vol. 37/2007. Springer Berlin / Heidelberg.
- Ollero, A. and L. Merino (2004). Control and perception techniques for aerial robotics. *Annual Reviews in Control* **28**(2), 167–178.
- Peng, K., G. Cai, B. M. Chen, M. Dong and T. H. Lee (2007). Comprehensive modeling and control of the yaw dynamics of a uav helicopter. In: *25th Chinese Control Conference, CCC 2006*. pp. 2087–2092.
- Phillips, C., C. L. Karr and G. Walker (1996). Helicopter flight control with fuzzy logic and genetic algorithms. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* **9**(2), 175–184.
- Pieper, J. K. (1995). Application of slmc: Trc control of a helicopter in hover. In: *Proceedings of the 1995 American Control Conference. Part 1 (of 6)*. Vol. 2. pp. 1191–1195.
- Prasad, J. V. R., A. J. Calise, Y. Pei and J. E. Corban (1999). Adaptive nonlinear controller synthesis and flight test evaluation: On an unmanned helicopter. In: *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Control Applications (CCA) and IEEE International Symposium on Computer Aided Control System Design (CACSD)*. Vol. 1. Piscataway, NJ, United States. pp. 137–142.
- Prouty, R. W. and H. C. Curtiss Jr. (2003). Helicopter control systems: A history. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* **26**(1), 12–18.
- Puntunan, S. and M. Parnichkun (2006). Online self-tuning pre-compensation for a pid heading control of a flying robot. *International Journal of Advanced Robotic Systems* **3**(4), 323–330.
- Sanchez, E. N., H. M. Becerra and C. M. Velez (2005). Combining fuzzy and pid control for an unmanned helicopter. In: *NAFIPS 2005 - 2005 Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society*. Vol. 2005. pp. 235–240.
- Sanchez, E. N., H. M. Becerra and C. M. Velez (2007). Combining fuzzy, pid and regulation control for an autonomous mini-helicopter. *Information Sciences* **177**(10), 1999–2022.
- Shim, H., T. J. Koo, F. Hoffmann and S. Sastry (1998a). Comprehensive study of control design for an autonomous helicopter. *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control* **4**, 3653–3658.
- Shim, H., T. J. Koo, F. Hoffmann and S. Sastry (1998b). Comprehensive study of control design for an autonomous helicopter. *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control* **4**, 3653–3658.
- Shin, J., D. Fujiwara, K. Hazawa and K. Nonami (2004). Model based optimal attitude and positioning control of small-scale unmanned helicopter. *Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, C Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C* **70**(9), 2631–2637.
- Shin, J., D. Fujiwara, K. Hazawa and K. Nonami (2002). Attitude control and hovering control of radio-controlled helicopter. *Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, C Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C* **68**(11), 3284–3291.
- Sira-Ramirez, H., R. Castro-Linares and E. Liceaga-Castro (2000). Liouvillian systems approach for the trajectory planning-based control of helicopter models. *International*

- Journal of Robust and Nonlinear Control* **10**(4), 301–320.
- Sugeno, M., Howard Winston, Isao Hirano and Satoru Kotsu (1995a). Intelligent control of an unmanned helicopter based on fuzzy logic. In: *Proceedings of the 1995 51st Annual Forum. Part 1 (of 3)*. Vol. 1. Alexandria, VA, United States. pp. 791–803.
- Sugeno, M., I. Hirano, S. Nakamura and S. Kotsu (1995b). Development of an intelligent unmanned helicopter. In: *Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Fuzzy Systems. Part 1 (of 5)*. Vol. 5. Piscataway, NJ, United States. pp. 33–34.
- Sutarto, H. Y., A. Budiyono, E. Joelianto and G. T. Hiong (2006). Switched linear control of a model helicopter. In: *9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, 2006, ICARCV '06*.
- Wade, Robert L. and Gregory W. Walker (1996). Flight test results of the fuzzy logic adaptive controller-helicopter (flac-h). In: *Navigation and Control Technologies for Unmanned Systems*. Vol. 2738. pp. 200–208.
- Wan, E. A. and A. A. Bogdanov (2001). Model predictive neural control with applications to a 6 dof helicopter model. In: *2001 American Control Conference*. Vol. 1. pp. 488–493.
- Witt, J., S. Boonto and H. Werner (2008). Approximate model predictive control of a 3-dof helicopter. In: *46th IEEE Conference on Decision and Control 2007, CDC*. pp. 4501–4506.
- Yang, C. D and W. H Liu (2003). Nonlinear h infinite decoupling hover control of helicopter with parameter uncertainties. In: *2003 American Control Conference*. Vol. 4. pp. 3454–3459.
- Yang, C. D, W. H Liu and C. C Kung (2002). Nonlinear h infinite decoupling control for hovering helicopter. In: *2002 American Control Conference*. Vol. 6. pp. 4353–4358.
- Yang, Chao and Shoufeng Song (1995). Analysis about current situation and development of helicopter dynamics. *Beijing Hangkong Hangtian Daxue Xuebao/Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics* **21**(2), 46–52.
- Zeng, L. L, D. B Wang, C. G Guo and X. H Huang (2006). Survey of flight control technology for unmanned helicopter. *Kongzhi yu Juece/Control and Decision* **21**(4), 361–366.